

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2022.04.028

鄱阳湖流域沉积物中重金属元素分布特征 及生态风险浅析

曹佰迪¹, 李文明^{1,*}, 周一凡², 杨忠芳³

(1. 中国地质调查局西安地质调查中心/西北地质科技创新中心, 陕西 西安 710054; 2. 西安勘察测绘院
地理信息中心, 陕西 西安 710054; 3. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘要:近年来,随着经济改革和工业化发展,直接或间接排入湖泊的污染物越来越多,由此带来的环境问题日渐突出,笔者以鄱阳湖流域为研究区,采集了鄱阳湖水系各支流枯水期(12~1月)沉积物样品,查明了鄱阳湖水系各支流沉积物中重金属元素的含量、分布、形态构成,分析了重金属元素在鄱阳湖水系河流水体中的迁移和转化的影响因素,并应用地质累积指数法和潜在生态危害指数法对重金属污染进行了评价。研究表明:鄱阳湖流域河流沉积物中重金属污染程度的大小为 $Cd > Cu > As > Zn > Pb$,各重金属对鄱阳湖生态风险构成危害的排列次序为 $Cd > As > Cu > Pb > Zn$ 。

关键词:鄱阳湖水系;地质累积指数法;潜在生态危害指数法;沉积物

中图分类号:P618.14

文献标志码:A

文章编号:1009-6248(2022)04-0343-11

Geochemical Characteristic and Fluxes of Trace Metal in Water System of the Poyang Lake

CAO Baidi¹, LI Wenming^{1,*}, ZHOU Yifan², YANG Zhongfang³

(1. Xi'an Center of China Geological Survey / Northwest China Center for Geoscience Innovation, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Geographic Information Center of Xi'an Survey and Mapping Institute, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: In recent years, with the economic reform and industrial development, more and more pollutants are directly or indirectly discharged into the lake, and the resulting environmental problems are becoming increasingly prominent. In this paper, taking the Poyang Lake basin as the research area, we collected sediment samples from various tributaries of the Poyang Lake water system during the dry season (December January), and found out the content, distribution, form and composition of heavy metals in the sediments of various tributaries of the Poyang Lake water system. This paper analyzes the influencing factors of migration and transformation of heavy metals in Poyang Lake water system, and evaluates the heavy metal pollution by using the geological cumulative index method and the potential ecological hazard index method. The results

收稿日期:2021-12-13;修回日期:2022-09-07;网络发表日期:2022-11-15;责任编辑:李辉

基金项目:中国地质调查局项目“黄河中上游生态地质调查”(DD20221774)资助。

作者简介:曹佰迪(1983-),女,硕士,构造地质学专业。E-mail:251929268@qq.com。

* 通讯作者:李文明(1984-),男,高级工程师,从事生态环境地质调查工作。E-mail:283547675@qq.com。

show that the pollution degree of heavy metals in river sediments of Poyang Lake basin is $Cd > Cu > As > Zn > Pb$, and the order of hazard of heavy metals to ecological risk of Poyang Lake is $Cd > As > Cu > Pb > Zn$.

Keywords: Poyang lake water system; geo-accumulation index; potential ecological risk index; sediment

鄱阳湖流域地质构造北部属于扬子准地台,中部和南部属于华南褶皱系,不同的地质构造发展演化阶段,其构造形态表现了明显的不同特征。在地槽阶段(北部晋宁期、中部和南部加里东期)以褶皱形变为主,北部地区褶皱方向为北东东到近东西向,至东部转为北东向,中部和南部地区褶皱方向为北北东到近南北向。北部地区在晚元古代晚期经晋宁运动褶皱回返转入准地台阶段,中部南部地区直到早古生代末期才经加里东运动强烈褶皱隆起作用,褶皱回返转为准地台阶段。

由于地质构造运动,尤其是第四纪以来的新构造运动,奠定了鄱阳湖流域现今地质结构、地貌轮廓和山形水势展布的基础。从南北向看,鄱阳湖流域地貌北部以平原(鄱阳湖平原)为主,南部以山区(赣南山区)为主,中部(赣中丘陵山区)为过渡区,这种宏观地貌格局与中国南方山区(中、西段)三大地貌区对应,具有一致的地貌分异特征。而从东西向看,鄱阳湖流域西部近南北向的罗霄山及其向北延伸的九岭山、幕阜山,东部近南北向的武夷山及其向北延伸的怀玉山、天目山、黄山余脉,与其间的鄱阳湖平原及以吉泰盆地为代表的众多河谷盆地形成了东西三大地貌带。鄱阳湖流域南北三大地貌区、东西三大地貌带、及南高北低的地势构成了流域的宏观地貌格局。鄱阳湖流域地势周高中低,三面环山,中部渐次由丘陵、盆地相间的地形向北成为坦荡的平原,即长江流域五大平原之一的鄱阳湖平原,主要河流发源于东、南、西 3 面边缘山地,顺势流入鄱阳湖。流域地貌类型以丘陵山地为主,丘陵山地约占总面积的 78%(其中山地占 36%,高丘 42%),平原岗地约占 12.1%,水面约占 9.9%。除上述常见地貌类型外,还有岩溶、丹霞和冰川等特殊地貌。

1 水系基本情况

鄱阳湖水系以鄱阳湖为汇水中心,整个鄱阳湖水系,面积 16.22 万 km^2 , 约占长江总流域面积的 9%,在江西境内流域面积 15.71 万 km^2 , 约占全省

总面积的 97%。江西五大主要河流赣、抚、信、饶、修河均汇入鄱阳湖,仅以湖口与长江相通,控制着流域与长江的水量吞吐平衡,多年平均年入湖径流量 1 509 亿 m^3 。它不仅接纳流域五大河来水,湖区周边还有 14 条 30 km 以上的河流直流入湖,在一定的情况下还接受长江水倒灌(图 1)。

2 不同介质中重金属元素的分布特征

鄱阳湖流域沉积物中重金属元素的含量低于悬浮物(表 1,图 2、图 3),除抚河外,沉积物中重金属元素的含量高于表层土壤。悬浮物中重金属元素的含量富集明显,沉积物中重金属元素的含量也有较高的富集,不同重金属元素在悬浮物中的富集程度存在着显著的差异。

鄱阳湖入湖口沉积物和悬浮物中重金属元素的含量高于表层土壤,但富集程度较低,此 3 种介质中重金属元素的含量相比于其他支流较低,说明了在湖口区特殊环境下,水动力条件等对重金属分配的影响。湖口区靠近长江,属于长江水和湖泊水的混合地带,每年七、八月份(丰水期)湖口区受到长江水的倒灌作用,因此,以各形态存在与水体中的重金属较难沉降,另外,枯水期及平水期存在于沉积物中的重金属,受河水倒灌的影响再悬浮,故湖区沉积物中的重金属元素含量较低(图 3)。

赣江是鄱阳湖水系的最大支流,除 Pb 外其沉积物中重金属的含量较低,As、Se、Cu、Ni 等元素在其悬浮物中较为富集。Pb 元素在赣江沉积物和悬浮物中的含量较高,富集较为明显。赣江流经南昌,工业废水排入和汽车尾气等人为影响使受环境影响很大的 Pb 含量偏高,另外,赣江上游花岗岩广泛分布,而花岗岩、页岩和片岩含铅量较高,这也使赣江沉积物、悬浮物和表层土壤中含 Pb 量均高于其他河流。

修水和抚河沉积物与土壤中重金属含量相差不大,抚河土壤中 Pb、Zn、Cu、Cd、Ni 等元素的含量略高于沉积物,悬浮物中重金属含量远高于沉积物和土壤,富集程度较高,尤其是 Cu、Ni 元素,其在抚河中显著富集,富集程度远高于其他河流。

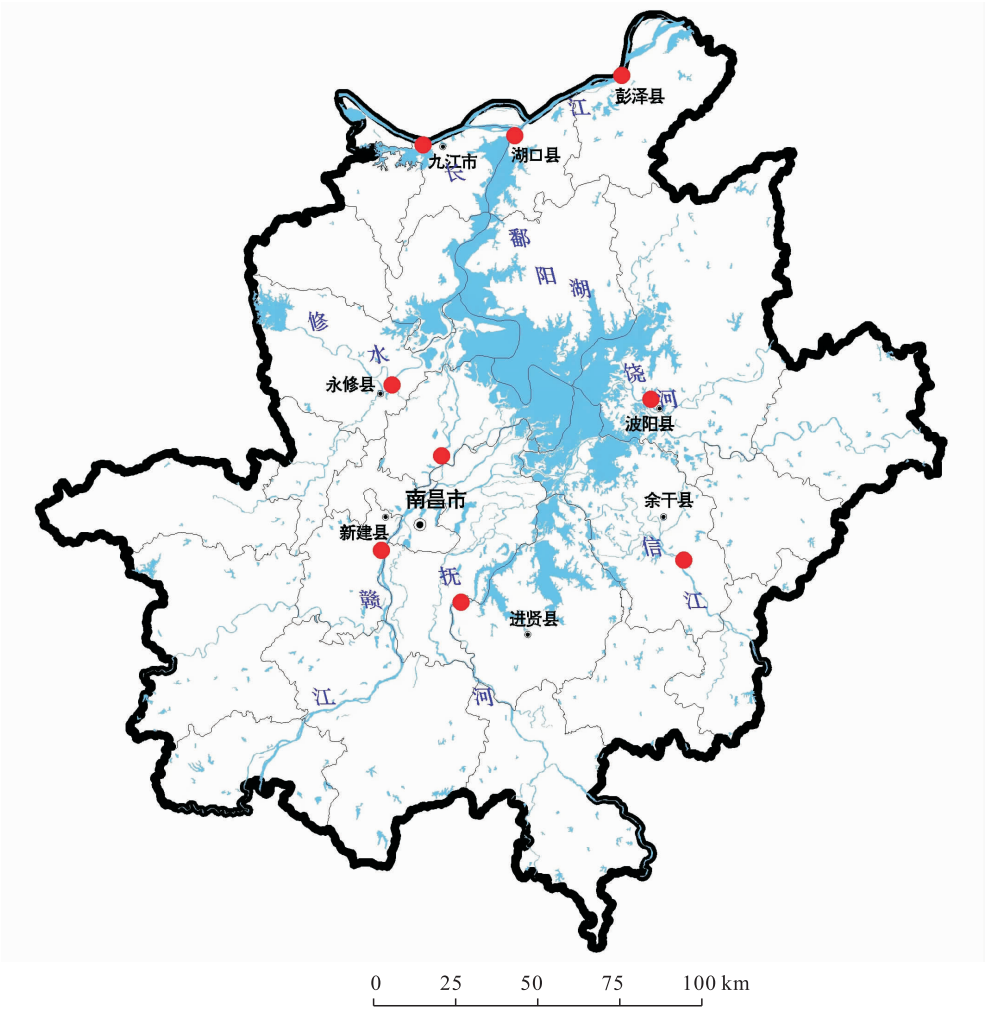


图 1 研究区概况

Fig. 1 Profile of the study area

表 1 鄱阳湖水系不同介质中重金属元素的含量(10^{-6})

Tab. 1 Contents of heavy metal elements in different media of poyang lake(10^{-6})

流域	流域介质	As	Se	Pb	Zn	Cu	Cd	Ni
鄱阳湖	悬浮物	26.26	0.66	50.41	189.70	51.12	0.58	54.15
	土壤	16.01	0.26	35.49	95.10	28.51	0.26	28.39
	沉积物	18.62	0.47	55.80	160.40	68.40	1.59	46.00
修水	悬浮物	40.88	1.53	52.83	205.40	133.21	1.11	67.95
	土壤	9.76	0.29	29.40	78.08	23.96	0.14	23.67
	沉积物	12.47	0.24	28.60	96.40	28.40	0.17	27.80
赣江	悬浮物	67.51	1.72	77.37	241.19	97.14	1.47	63.31
	土壤	9.73	0.30	36.73	77.63	24.30	0.19	22.89
	沉积物	23.05	0.49	65.15	147.95	38.15	0.99	26.70
抚河	悬浮物	26.90	1.36	54.00	264.21	420.39	2.43	281.76
	土壤	8.07	0.29	34.83	72.91	22.92	0.15	21.64
	沉积物	8.80	0.24	34.00	60.70	17.10	0.09	19.10

续表

流域	流域介质	As	Se	Pb	Zn	Cu	Cd	Ni
信江	悬浮物	170.18	0.61	46.59	686.40	410.35	55.30	96.32
	土壤	9.62	0.33	34.76	74.70	28.04	0.20	23.51
	沉积物	38.26	0.81	61.30	199.20	108.60	5.27	23.60
饶河	悬浮物	103.36	3.69	54.24	375.12	243.68	8.21	88.98
	土壤	8.99	0.30	30.97	73.46	30.51	0.19	25.11
	沉积物	26.71	0.74	54.60	288.50	182.70	1.63	36.10

注：* 选用的土壤为表层土壤,悬浮物参考“鄱阳湖水系重金属元素地球化学特征及入湖通量”所测数据(李文明等,2014)。

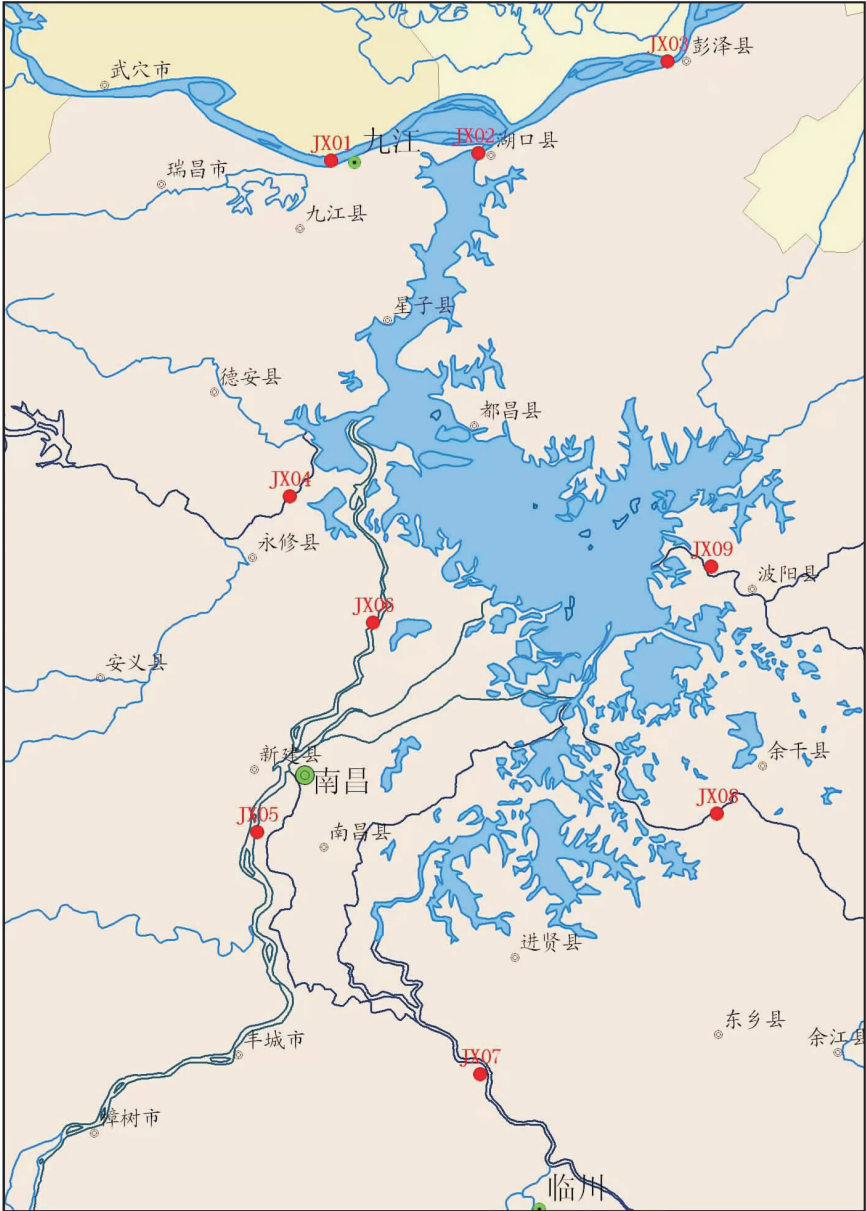
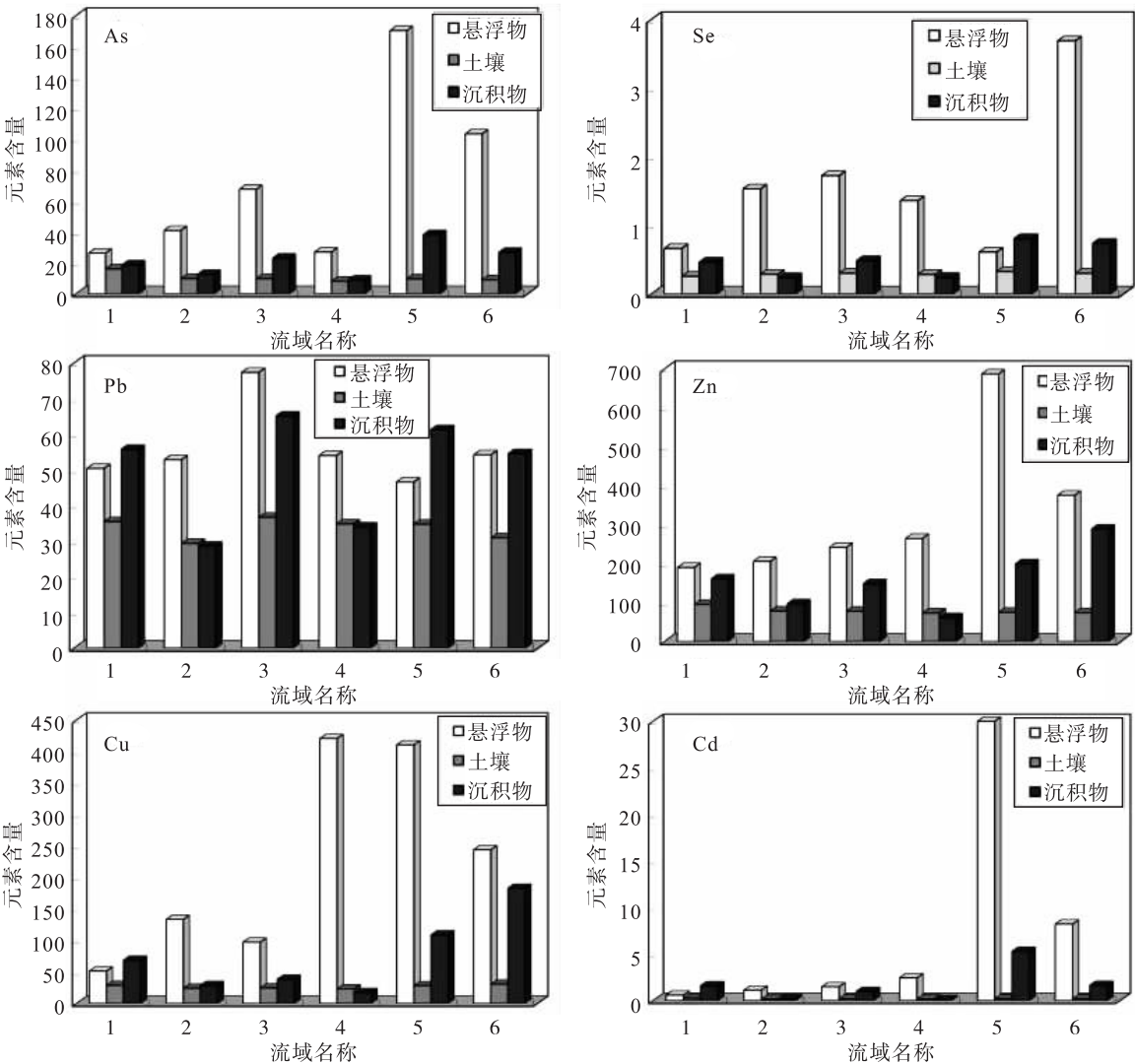


图 2 鄱阳湖采样位置图

Fig. 2 The sampling sites at water system of the Poyang Lake



1. 鄱阳湖;2. 修水;3. 赣江;4. 抚河;5. 信江;6. 饶河

图 3 不同介质中重金属元素含量对比图(10^{-6})

Fig. 3 Comparison of heavy metal element content in different media(10^{-6})

信江和饶河沉积物(除 Pb 外)中重金属元素的含量均高于表层土壤,悬浮物中重金属的含量较高,富集显著,尤其是 Cd 元素。信江流经永平铜矿,饶河流经德兴铜矿,由于纳入开矿酸性废水,水体中重金属元素含量较高。从图 1 可以看出,饶河和信江沉积物中重金属元素的含量高于其他河流,与表层土壤相比,重金属元素在其沉积物中有较高的富集,尤其是 Cu、Zn 和 Cd 元素,其在饶河和信江沉积物中富集明显。饶河和信江悬浮物中 Cu、Zn 等重金属元素富集程度较高是由于 Cu、Zn 等元素在水体中主要以悬浮态形式迁移,易被悬浮物吸附。

鄱阳湖流域沉积物与表层土壤富集倍数显示

(表 2),重金属元素在各河流沉积物中富集程度有很大的差异,Cd 的富集程度大于其他重金属元素,平均富集 8.6 倍,其次是 Cu,平均富集 2.8 倍,As、Zn 和 Se 的富集程度相对于 Cd、Cu 较低,平均富集约 2 倍,Pb 和 Ni 的富集程度最小,富集倍数分别为 1.5 和 1.2 倍。与表层土壤相比,悬浮物中 Cd 的富集程度更高,平均富集 61 倍,其次也为 Cu,平均富集 8.6 倍,与沉积物不同,Ni 在悬浮物中有较高的富集;Pb 在悬浮物和沉积物中的富集程度接近,其他元素平均富集倍数变化范围为 2.1~3.6 倍。与表层土壤相比,鄱阳湖水系沉积物中重金属的平均富集程度为 $Cd > Cu > As > Zn > Se > Pb > Ni$,悬浮

物中重金属的平均富集程度为 $Cd > Cu > As > Se > Ni > Zn > Pb$ 。

表 2 不同介质中重金属元素的平均富集倍数
Tab. 2 Average enrichment factor of heavy metal elements in different media

介质	As	Se	Pb	Zn	Cu	Cd	Ni
悬浮物/沉积物	3.4	3.2	1.1	2.1	3.1	7.1	3.6
悬浮物/土壤	7.0	5.4	1.7	4.2	8.6	61.0	4.5
沉积物/土壤	2.1	1.7	1.5	2.0	2.8	8.6	1.2

3 沉积物中重金属元素的含量对比

不同重金属元素在鄱阳湖流域沉积物中的含量各不相同,这不仅与河流流经的区域有关,还与元素的地球化学性质有关。赣江为鄱阳湖最大支流,其沉积物中重金属元素有较高的含量,重金属含量为 $Zn > Pb > Cu > Ni > As > Cd > Se$,赣江上游花岗岩广泛分布,部分区域分布碳酸盐岩,花岗岩中含铅量较高,并常与锌、铜等元素共存,这是造成赣江沉积物中 Zn 、 Pb 、 Cu 元素含量较高的原因(图 4)。

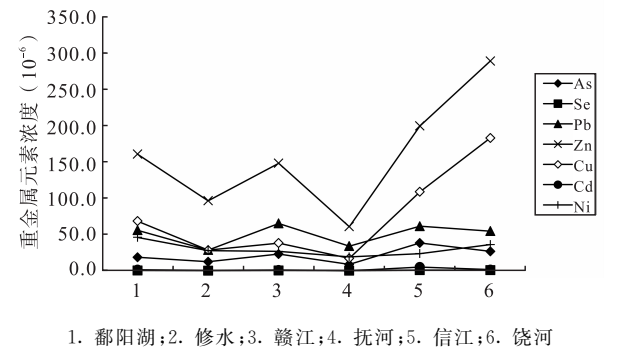


图 4 鄱阳湖流域沉积物中重金属元素浓度对比图

Fig. 4 Comparison map of heavy metal element concentration in sediments of Poyang Lake Basin

饶河上游支流乐安江流经德兴铜矿矿区,此处主要以铜钼矿和铅锌矿为主,故沉积物中 Zn 、 Cu 、 Pb 、 Ni 等元素的含量偏高, Cu 、 Zn 元素的含量明显高于其他河流,重金属含量为 $Zn > Cu > Pb > Ni > As > Cd > Se$ 。

信江发源于浙赣两省交界的怀玉山南的玉山水和武夷山北麓的丰溪水,其主要支流铅山河流经铅

山县永平铜矿,永平铜矿以铜硫为主,伴有 W 、 Ag 、 Pb 、 Zn 等,这就使得信江沉积物中 Zn 、 Cu 、 Pb 等元素含量较高,重金属含量为 $Zn > Cu > Pb > As > Ni > Cd > Se$ 。

修水和抚河沉积物中重金属元素的含量低于其他河流,重金属含量分别为 $Zn > Pb > Cu > Ni > As > Se > Cd$ 和 $Zn > Pb > Ni > Cu > As > Se > Cd$ 。由于永修县工矿企业相对较多,县城人口也较为集中,工业废水和生活污水排放量增大,造成修水下游水质污染加重,人为污染源造成修水沉积物中重金属元素的含量高于抚河。而且, Cd 和 Zn 属于同一副族元素,化学性质相似,在自然界经常相伴出现;闪锌矿、铜矿、铅矿和其他含有锌矿物的矿石中都会有镉的出现,这也是饶河和信江沉积物中 Cd 含量较其他河流高的原因。

4 沉积物中重金属环境质量现状评价

沉积物是河流生态系统的一个重要组成部分。国内外学者的大量研究表明,受重金属污染的河流系统中,液态和固态间存在着非常复杂的物理、化学和生物过程,这种变化取决与水环境的条件以及沉积物的来源与构成(何孟常,1998;王静雅等,2004)。另外,受重金属污染的河流水体,重金属污染物不易溶解,水相中的重金属大部分会迅速从水相转入固相,即迅速结合到悬浮物或沉积物中。结合到悬浮物中的重金属在被水流搬运过程中,当其负荷超过搬运能力时,也最终进入沉积物中。这就导致了河流沉积物中重金属的含量比相对应的水相中的重金属含量高很多,其稳定性也较高,而且水体沉积物重金属含量常会得到累积,表现出比较明显的含量分布规律。因此,沉积物是水环境中重金属的“汇”,作为水体中重金属的主要蓄积场所,沉积物反映了水体受重金属污染的状况。

重金属不是固定在沉积物当中的,当外界的环境条件发生变化时(如存在氧化还原电位和有机质螯合物等),束缚在沉积物中的重金属可以被释放出来,这将会引起重金属迁移性和生物可利用性的改变,或使重金属重新返回水体中,造成二次污染(Forsfier U,1987)。因此,对水体沉积物的重金属污染的研究已成为科学工作者们研究的重点,现在,沉积物分析已经成为追踪内陆和沿海水体人为污染

影响的重要途径。对河流沉积物的研究不仅有利于了解水体重金属污染的状况,而且可以了解河流重金属污染对两岸土壤的影响,也可以进一步了解沉积物重金属对生态环境所存在的潜在危害。

4.1 评价方法和评价标准的选取

对于大气和水质量评价中采用的参比值数据一般都是国家颁布的各种环境标准值,而对河流沉积物中重金属污染评价,没有系统的环境标准,大部分采用的是沉积物的元素地球化学背景或该区域无污染时的数据值作为参比标准。而且目前中国也还没有统一的水体沉积物质量评价方法,所以国内的很多学者大多借鉴国外沉积物质量评价方法。关于沉积物重金属污染的评价的方法多种多样,比较具有代表性的有:地累积指数法、沉积物富集系数法、潜在生态危害指数法、模糊集理论、污染负荷指数法、脸谱图法和回归过量分析法等,这些方法各有优缺点,使用范围也不一(霍文毅,1997;范文宏,2002)。张鑫(2005)等对沉积物各种评价方法进行了比较和研究,认为地累积指数法(Igeo)和沉积物富集系数法(SEF)是据重金属的总含量进行评价,仅能一般地了解重金属的污染程度,难以区分沉积物中重金属的来源(自然源和人为源),也难以反应沉积物中重金属的化学活性和生物可利用性,故不能有效的评价重金属的迁移性质和潜在的生态危害。而潜在生态危害指数法(PERI)用测定沉积物中重金属浓度的方法,评价水域中重金属的潜在生态危害,具有简便、快速且较为准确的特点,同时又体现了对化学分析、生物毒性及指数灵敏度的要求,指标涵盖了环境化学、生物毒理学和生态学内容,也顾及了背景值的地域分异性。不过,潜在生态危害指数法的不足之处在与评价指标没有充分体现水化学参数(pH、Eh、碱度及配位体)等对毒性的影响,也未包括水文、地貌等沉积环境条件对元素地球化学分布的影响等,需要与 Igeo 相互补充,以求进一步的完善。另外,次生相与原生相分布比值法、水体沉积物重金属质量基准法、回归过量分析法等存在只能评价小区域同源沉积,方法本身建立在经验假设基础上及不能确定污染级别等,经综合考虑笔者选用地质累积指数法和潜在生态危害指数法来对鄱阳湖流域沉积物重金属的环境质量现状进行评价。

在选沉积物元素地球化学背景值作参比值时,必须考虑沉积物粒度组成对重金属测定值的影响。

在 Muller 的地累积指数法中(Muller G,1981),采用作为沉积物世界性标准的页岩(相当于 $<2\text{ }\mu\text{m}$ 的黏土沉积物)的平均组成为参比值。国内外其他学者在用地累积指数法评价沉积物重金属污染时,采用标准各不统一,各国对参比值的选择差别较大,一般都结合区域的实际情况来选择评价标准,如沉积物环境质量评价标准、当地的沉积物重金属背景值等(弓晓峰等,2006)。欧洲(尤其是在德国),颗粒物中重金属的数据全部来自 $<2\text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒物样品,故采用页岩的平均组成作评价标准是比较合理的。但在很多国家(包括中国)研究河流颗粒物时(霍文毅,1997),大部分筛选粒径 $<63\text{ }\mu\text{m}$ (或 $<50\text{ }\mu\text{m}$)的样品进行研究,所以以粒径 $<2\text{ }\mu\text{m}$ 的页岩组成作为参比值将使所计算出的重金属污染水平等级降低。所以在用地累积指数法研究沉积物污染状况时,应尽量选择与该区沉积物地球化学特征与环境特征接近的地球化学背景值(滕彦国等,2002)。因此,笔者采用鄱阳湖水系各支流深层土壤平均值作为评价标准,具体评价标准见表 3。

表 3 沉积物重金属元素背景值
(各支流流域深层土壤平均值)

Tab. 3 Background value of heavy metal elements in sediments(Average value of deep soil in each tributary basin)					
元素	As	Pb	Zn	Cu	Cd
鄱阳湖	12. 01	32. 64	79. 70	25. 71	0. 18
修水	12. 71	26. 67	79. 31	25. 79	0. 08
赣江	10. 19	32. 38	77. 54	23. 92	0. 12
抚河	9. 09	29. 90	72. 42	21. 38	0. 07
信江	11. 41	32. 93	76. 01	26. 74	0. 09
饶河	13. 41	27. 54	80. 27	27. 38	0. 09

4.2 地质累积指数法及评价结果

地质累积指数法在欧洲被广泛采用,在中国也被部分学者采用过。此方法是德国海德堡大学沉积物研究所的科学家 Muller G(1981)提出的一种定量研究水环境沉积物中重金属元素污染状况的评价方法,该方法不仅考虑了沉积成岩作用成等自然地质过程造成的背景值的影响,而且也充分注意了人为活动对重金属污染的影响。因此,不仅反映了重金属分布的自然变化特征,也可以判别人为活动对环境的影响,是区分人类活动影响的重要参数。

地质累积指数(Index of Geoaccumulation, I_{geo}) 表达公式如下:

$$I_{geo} = \log_2 [C_n / (k \times B_n)] \tag{1}$$

式中, C_n 是元素 n 在小于 $2\mu m$ 沉积物中的含量; B_n 为粘质沉积岩(即普通页岩)中该元素的地球化学背景值; k 为考虑各地岩石差异可能会引起背景值的变动而取的系数(一般取值为 1.5)。 I_{geo} 值与重金属污染水平的关系如表 4 所示(Forsfier U et al., 1990)。

表 4 地累积指数与污染程度分级

Tab. 4 Land accumulation index and pollution degree classification

I_{geo}	级数	污染程度
<0	0	无
$0\sim1$	1	无一中
$1\sim2$	2	中
$2\sim3$	3	中—强
$3\sim4$	4	强
$4\sim5$	5	强—极强
>5	6	极强

将鄱阳湖流域沉积物重金属实测值及沉积物重金属元素背景值带入式(1), 可得鄱阳湖水系沉积物中重金属元素的地累积指数及指数分级情况(表 5)。

从不同流域分析, 修水和抚河沉积物中重金属的地累积指数最低, 说明修水和抚河沉积物未污染; 鄱阳湖湖口沉积物中重金属地累积指数为 1(除 Cd 外), 沉积物无污染或中度污染, Cd 的沉积物地累积指数达到 3, 属于中度接近强度污染; 赣江与鄱阳湖相似, 除 Cd 外, 沉积物无污染或中度污染, Cd 在赣

江沉积物的地累积指数也为 3, 属中度接近强度污染; 信江和饶河的地累积指数相比与其他河流较高, 沉积物中重金属污染较严重, As、Pb 和 Zn 无污染或中度污染, Cu 中度接近强度污染, Cd 的污染程度最高, Cd 在信江和饶河沉积物中的地累积指最高, 信江沉积物中 Cd 的污染程度为极强即沉积物中 Cd 严重污染, 饶河沉积物中 Cd 强度污染。

从重金属污染物污染程度分析, 沉积物中重金属污染程度的大小为 $Cd > Cu > As > Zn > Pb$ 。鄱阳湖流域沉积物中 As、Pb 和 Zn 无污染接近中度污染, Cu 在部分河流沉积物中度接近强度污染, 而多数支流沉积物中 Cd 中度或强度污染, 个别河流极强污染, 其危害不容忽视。

整体来看, 流域中 Cd 污染较为严重, 沉积物中 Cd 有较高富集, Cd 污染的这种趋势与鄱阳湖流域表层土壤中 Cd 的异常一致, 鄱阳湖流域多目标地球化学调查显示, 信江和饶河流域两岸土壤中 Cd 有较高的富集, 初步推断其异常可能由其上游的铜矿引起, 应进一步调查查明其主要异常的输入源。总之, 利用地累积指数法可知, 鄱阳湖流域各河流沉积物中 Cd 和 Cu 的污染程度最高, 流域内信江和饶河 Cu 中度污染接近强度污染, Cd 强度污染接近极强污染。对于达到强度污染的流域应采取治理措施, 引起重视, 加强监测, 防止其进一步危及其他区, 对于中度污染区域应提前保护以免其污染。

4.3 潜在生态危害指数法及评价结果

潜在生态危害指数法(RI)是瑞典学者 Hakan-son 于 1980 年提出(Forsfier U, 1993), 在国际上具有较大的影响, 这是用沉积学原理评价重金属及生态危害的方法。潜在生态危害指数法的优点在于:

表 5 重金属元素的地累积指数及指数分级

Tab. 5 Geoaccumulation index and index classification of heavy metal elements

元素	As		Pb		Zn		Cu		Cd	
流域	I_{geo}	分级	I_{geo}	分级	I_{geo}	分级	I_{geo}	分级	I_{geo}	分级
鄱阳湖	0.05	1	0.19	1	0.42	1	0.83	1	2.54	3
修水	-0.61	0	-0.48	0	-0.30	0	-0.45	0	0.57	1
赣江	0.59	1	0.42	1	0.35	1	0.09	1	2.40	3
抚河	-0.63	0	-0.40	0	-0.84	0	-0.91	0	-0.27	0
信江	1.16	2	0.31	1	0.81	1	1.44	2	5.25	6
饶河	0.41	1	0.40	1	1.26	2	2.15	3	3.62	4

①具有综合性:综合考虑了重金属的毒性、重金属在沉积物中普遍的迁移转化规律和评价区域对重金属污染的敏感性。②不仅反映了各种重金属污染物在某一特定环境下的影响,也反应了多种重金属污染物的综合影响,即受多种重金属污染的沉积物的潜在危害指数值高于只受少数几种重金属污染的沉积物的潜在危害指数值。这些优点也使其成为了国外沉积物质量评价中应用最为广泛的方法之一。

其计算公式如下:

$$RI = \sum_i^m E_r^i = \sum_i^m T_r^i \times \frac{C^i}{C_n^i} \tag{2}$$

式中, RI 为沉积物中多种重金属潜在生态危害指数; $c_f^i=c^i/C_n^i$ 为单因子污染物污染参数; c^i 为实测值($\times 10^{-6}$); C_n^i 为参比值;参比值采用工业化以前沉积物中重金属的最高背景值; T_r^i 为第 i 种重金属的毒性系数,反映其毒性水平和生物对其污染的敏感程度; E_r^i 为第 i 种重金属的潜在生态危害系数。参比值 C_n^i 的为鄱阳湖水系各支流深层土壤平均值(表 6)。

重金属元素中 Cd 的毒性系数最大,其次为 As 元素,各种重金属的毒性系数 T_r^i 的值见表 7。

表 6 潜在生态危害系数、潜在生态危害指数的污染分级

Tab. 6 Pollution classification of potential ecological hazard coefficient and potential ecological hazard index

污染参数 c_f^i 范围	单因子污染 物污染程度	多因子污染物污 染程度(Cd 范围)	总的污 染程度	潜在生态风险 参数 E_r^i	单因子污染物 生态风险程度	潜在生态风险 指数 RI 范围	总潜在生态 风险程度
$c_f^i<1$	低度	$Cd<8$	低度	$E_r^i<40$	低度	$RI<150$	低度
$1\leq c_f^i<3$	中度	$8\leq Cd<16$	中度	$40\leq E_r^i<80$	中	$150\leq RI<300$	中度
$3\leq c_f^i<6$	重度	$16\leq Cd<32$	重度	$80\leq E_r^i<160$	较重	$300\leq RI<600$	重度
$c_f^i\geq 6$	严重	$Cd\geq 32$	严重	$160\leq E_r^i<320$ $E_r^i\geq 320$	重 严重	$RI\geq 600$	严重

表 7 重金属的参照值和毒性系数

Tab. 7 Reference value and toxicity coefficient of heavy metals

重金属元素	As	Pb	Zn	Cu	Cd
T_r^i	10	5	1	5	30

将鄱阳湖流域沉积物重金属实测值及沉积物重金属的参照值和毒性系数值带入式(2),可得沉积物中重金属污染程度以及潜在生态风险程度(表 8),表中 c_f^i 为单因子污染程度, Cd 为多因子污染程度, E_r^i 和 RI 为潜在生态风险参数和潜在生态风险指数。

表 8 重金属污染程度以及潜在生态风险程度
Tab. 8 Heavy metal pollution and potential ecological risk

流域	As		Pb		Zn		Cu		Cd		Cd	RI
	c_f^i	E_r^i	c_f^i	E_r^i	c_f^i	E_r^i	c_f^i	E_r^i	c_f^i	E_r^i		
鄱阳湖	1.55	15.50	1.71	8.55	2.01	2.01	2.66	13.30	8.72	261.67	16.66	301.03
修水	0.98	9.81	1.07	5.36	1.22	1.22	1.10	5.51	2.23	66.91	6.60	88.80
赣江	2.26	22.61	2.01	10.06	1.91	1.91	1.59	7.97	7.94	238.12	15.71	280.66
抚河	0.97	9.68	1.14	5.69	0.84	0.84	0.80	4.00	1.25	37.44	4.99	57.64
信江	3.35	33.54	1.86	9.31	2.62	2.62	4.06	20.31	56.91	1707.4	68.81	1773.2
饶河	1.99	19.91	1.98	9.91	3.59	3.59	6.67	33.36	18.44	553.32	32.68	620.10
均值	1.85	18.51	1.63	8.15	2.03	2.03	2.82	14.08	15.92	477.47		

流域各河流沉积物中各重金属元素的含量差异,导致其重金属污染程度也有很大的差异。分析单因子污染参数(c_f^i),Cu 和 Cd 较高与其他重金属元素,除修水和抚河外,Cd 在沉积物中的污染都达到了严重程度,在信江沉积物单因子污染参数高达 57,是修水和抚河单因子污染参数的几十倍;Cu 在饶河沉积物中严重污染,信江沉积物中重度污染,其他河流也为低度或中度污染。其他元素除 Zn 在饶河,As 在信江达到重度污染外,其在各河流沉积物中均为低度或中度污染。

从流域各河流总的污染程度(Cd)看,信江和饶河沉积物重金属的污染程度 >32 ,说明信江和饶河沉积物严重污染,鄱阳湖沉积物重度污染,赣江沉积物接近重度污染,修水和抚河污染程度最小,为低度污染。

分析总的生态风险参数即生态风险指数(RI),信江 $RI=1\ 773.18(>600)$,其总潜在生态风险程度达到严重;饶河 $RI=620.10(>600)$,总潜在生态风险也达到严重程度,鄱阳湖 $RI=301.03(>300)$,总潜在生态风险程度达到重度,赣江 $RI=280.66(\approx 300)$,总潜在生态风险程度接近重度,而修水和抚河 RI 值均小于 150,总潜在生态风险均为低度生态风险。总的来说,从流域各河流总的污染程度分析,各重金属对鄱阳湖生态风险构成危害的排列次序为 $Cd>As>Cu>Pb>Zn$ 。

5 结论

(1)鄱阳湖流域河流沉积物中重金属污染程度的大小为 $Cd>Cu>As>Zn>Pb$;信江和饶河沉积物为严重污染,总的污染程度 Cd、Cu 最高,与重金属污染程度一致;各重金属对鄱阳湖生态风险构成危害的排列次序为 $Cd>As>Cu>Pb>Zn$ 。

(2)信江上游的永平铜矿可能是导致信江沉积物中 Cd、Cu 污染的原因,而饶河上游乐安江的德兴铜矿是导致其沉积物中 Cd、Cu 污染的直接原因;乐安江上游的铜钼矿和铅锌矿及下游的煤矿使得饶河段土壤和水系沉积物中重金属都有较高的含量,AMD(酸性矿山废水)的排放使其下游沉积物中重金属元素含量偏高。

参考文献(References):

- 陈继平,钞中东,任蕊,等. 陕西关中富硒土壤区农作物重金属含量相关性及其安全性评价 [J]. 西北地质, 2021, 54(2): 273-281.
- CHEN Jiping, CHAO Zhongdong, REN Rui, et al. Correlation and Safety Evaluation of Crop Heavy Metal Content in Shaanxi Guanzhong Selenium-enriched Areas [J]. Northwestern Geology, 2021, 54(2): 273-281.
- 范文宏,陈静生,洪松,等. 沉积物中重金属生物毒性评价的研究进展[J]. 环境科学与技术, 2002, 25(1): 36-39.
- FAN Wenhong, CHEN Jingsheng, HONG Song, et al. Research progress on biotoxicity assessment of heavy metals in sediments [J]. Environmental Science and Technology, 2002, 25(1): 36-39.
- 弓晓峰,陈春丽,周文斌,等. 鄱阳湖底泥中重金属污染现状评价[J]. 环境科学, 2006, 27(4): 732-736.
- GONG Xiaofen, CHEN Chunli, ZHOU Wenbin, et al. Evaluation of heavy metal pollution in sediments of Poyang Lake [J]. Environmental Science, 2006, 27(4): 732-736.
- 何孟常. 水体沉积物重金属生物有效性及评价方法[J]. 环境科学进展, 1998, 6(5): 9-19.
- HE Mengchang. Bioavailability and evaluation methods of heavy metals in water sediments [J]. Progress of Environmental Science, 1998, 6(5): 9-19.
- 霍文毅,黄风茹,陈静生,等. 河流颗粒物重金属污染评价方法比较研究[J]. 地理科学, 1997, 17(1): 81-86.
- HUO Wenyi, HUANG Fengru, CHEN Jingsheng, et al. Comparative study on evaluation methods of heavy metal pollution in river particulates [J]. Geographical Sciences, 1997, 17(1): 81-86.
- 李文明,杨忠芳,周雷,等. 鄱阳湖水系重金属元素地球化学特征及入湖通量[J]. 现代地质, 2014, 28(3): 1-12.
- LI Wenming, YANG Zhongfang, ZHOU Lei, et al. Geochemical Characteristic and Fluxes of Heavy Metals in Water System of the Poyang Lake [J]. Geoscience, 2014, 28(3): 1-12.
- 刘瑞平,徐友宁,张江华,等. 含重金属的尾矿渣场复垦还田种植农作物的安全技术 [J]. 西北地质, 2019, 52(2): 236-246.
- LIU Ruiping, XU Youning, ZHANG Jianghua, et al. Safe Technology of Crops in Reclaimed Farmland of Heavy

- Metals Tail Slag Field [J]. *Northwestern Geology*, 2019, 52(2): 236-246.
- 滕彦国, 庾先国, 倪师军, 等. 应用地质累积指数评价沉积物中重金属污染: 选择地球化学背景的影响[J]. *环境科学与技术*, 2002, 25(2): 7-9.
- TENG Yanguo, TUO Xianguo, NI Shijun, et al. Evaluation of heavy metal pollution in sediments using the geoaccumulation index: the influence of geochemical background [J]. *Environmental Science and Technology*, 2002, 25(2): 7-9.
- 王静雅, 李泽琴, 程温莹, 等. 湖相沉积物中重金属环境污染研究进展[J]. *地球科学进展*, 2004, 19(sup.): 434-438.
- WANG Jingya, LI Zeqin, CHENG Wenying, et al. Research progress on heavy metal pollution in lacustrine sediments [J]. *Advances in Earth Science*, 2004, 19(sup.): 434-438.
- 张鑫, 周涛发, 杨西飞, 等. 河流沉积物重金属污染评价方法比较研究[J]. *合肥工业大学学报*, 2005, 28(11): 1419-1423.
- ZHANG Xin, ZHOU Taofa, YANG Xifei, et al. Comparative study on evaluation methods of heavy metal pollution in river sediments [J]. *Journal of Hefei University of Technology*, 2005, 28(11): 1419-1423.
- Abdel-Moati A R. Behaviour and flux of copper and lead in the Nile River estuary[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1990, 30: 153-165.
- Boyle E A. The chemical mass-balance of the Amazon Plume: II. Copper, nickel and cadmium[J]. *Deep Sea Research*, 1982, 29(11): 1355-1364.
- Forsfrier U. Ahlf W, Calmano W, et al. Sediment criteria development-contributions from environmental geochemistry to water quality management [A]. In: Heling D, Rothe P, Forstner U, et al. *Sediments histories and environment geochemistry: select aspects and case histories* [C]. Berlin: Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1990, 12(6): 311-338.
- Forsfrier U. In *Metals Speciation, Separation and Recovery* [M]. Lewis: Michigan, 1987: 3-26.
- Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, 14(8): 975-1001.
- Huang W W, Zhang J, Zhou Z H. Particulate element inventory of the Huanghe (Yellow River): A large, high turbidity river [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1992, 56: 3669-3680.
- Chen Jingsheng, Wang Feiyue, Xia Xinghui, et al. Major element chemistry of the Changjiang (Yangtze River) [J]. *Chemical Geology*, 2002, 187: 231-255.
- Muller G. Sediment index [J]. *Chemiker Zeitung*, 1981, 105(52): 53-58.
- Presley B, Trefry J H, Shokes R F. Heavy metal input to Mississippi delta sediments, a historical view [J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 1980, 13: 481-494.
- Zhang J, Liu C L. Riverine composition and estuarine geochemistry of particulate metals in China: Weathering features, anthropogenic impact and chemical fluxes [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2002, 54: 1051-1070.
- Zhang J. Geochemistry of trace metals from Chinese river/estuary systems: An overview [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1995, 41: 631-658.